



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Universidad Politécnica de Cataluña

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
(ETSECCPB)

ECA – Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

“Excavación en roca arcillosa anisótropa. Análisis de un caso real.”

TESINA

Que para obtener el título de:

**Master Universitario en Ingeniería del Terreno e Ingeniería Sísmica;
Especialidad en Ingeniería Geotécnica**

Presenta:

Carlos Dowell Fábrega

Director:

Jean Vaunat

Barcelona, España

Octubre 2016

Índice

1. Introducción	2
2. Formulación matemática	4
2.1. Formulación-HM	4
2.1.1. Balance de masas de sólidos	4
2.1.2. Balance de masas de agua	4
2.1.3. Balance de tensiones	6
2.2. Descripción del modelo constitutivo	6
3. Descripción del modelo numérico	7
3.1. Parámetros del material	7
3.2. Geometría	8
3.3. Condiciones iniciales y condiciones de contorno	9
3.3.1. Condiciones de contorno (Modelo 3D)	10
3.3.2. Condiciones iniciales (Modelo 3D)	11
3.3.3. Proceso constructivo	11
4. Resultados	15
4.1. Presiones de agua	15
5. Conclusiones	22
Bibliography	23

1. Introducción

El “MODelling EXperiment Response to shaft (Puits) sinking” o mejor conocido como MODEX-REP por sus siglas en inglés fue un estudio que se basó en la modelación de una excavación de un pozo en dos dimensiones para reproducir una representación o comportamiento lo más cercano posible a la excavación real. En este estudio se utilizaron dos herramientas fundamentales para modelar el problema en 3 dimensiones: GiD y Code_Bright.

El experimento REP fue un experimento a gran escala que se realizó durante la excavación de un pozo de acceso a un laboratorio subterráneo de ANDRA en Bure, Francia. El laboratorio se sitúa a 500m de profundidad en una capa de lutitas Callovo-Oxfordiense, una arcilla sedimentaria rígida perteneciente a la era Mesozoica. La excavación del pozo se realizó con explosivos por distintas fases en donde el radio promedio del pozo fue de 3.18m. Para monitorear el comportamiento del pozo se implementó una instrumentación extensa en donde se utilizaron: 20 piezómetros, 2 extensómetros, 4 células para medir deformaciones, 1 inclinómetro y 4 sondeos pequeños para medir la velocidad de propagación de onda sísmica o de corte en el medio. Esta instrumentación fue colocada a una profundidad entre 445m y 475m donde se midió la respuesta de la roca a medida progresaba el frente de excavación. También se instalaron 2 extensómetros radiales a 467m de profundidad una vez excavado el pozo en ese nivel y 1 extensómetro vertical en la parte inferior del pozo para medir convergencias (Vaunat , Benoit, & Gens, 2006).

Se realizaron en paralelo con el experimento, simulaciones numéricas, en primera instancia de predicción, y en segunda instancia de interpretación, mediante el programa de elementos finitos Code_bright. Las simulaciones se realizaron considerando una configuración axisimétrica y representaron el proceso de excavación con todas sus fases.

Los resultados del modelo predictivo realizado por la UPC indican que se puede lograr una buena representación de la respuesta hidromecánica de la roca. Las magnitudes de convergencia y de desplazamientos son parecidas a las observadas in situ, sin embargo, había diferencias significativas al pasar del tiempo. En cuanto a las presiones de agua, estas son más difíciles de reproducir lo cual sugiere un cambio de la permeabilidad del medio y/o un cambio en las condiciones de contorno del modelo. Las presiones de agua evidentemente se desarrollan a medida que avanza el frente de excavación y se reducen gradualmente debido al drenaje hacia el pozo excavado. Esto quiere decir que en puntos lejanos del pozo las presiones de agua cambian únicamente debido al efecto de la excavación o descarga del terreno ya que por efectos de drenaje y tiempo no se pueden alcanzar esas distancias. De igual manera los desplazamientos inmediatos que se observan en la pared del pozo son debido a la excavación pero los desplazamientos al pasar el tiempo están relacionados con el efecto de drenaje hacia el pozo.

En el modelo interpretativo se incorpora el efecto del nicho de instrumentación al igual que la permeabilidad intrínseca de un medio anisótropo (diferentes valores en la dirección horizontal y vertical). Los resultados de este modelo no muestran muchas diferencias en las

magnitudes de desplazamientos comparados con el modelo predictivo, por lo que el modelo predictivo muestra una buena respuesta en cuanto a los desplazamientos. Por lo contrario, la presencia del niche de instrumentación resulta en una buena representación de las presiones de agua después de un largo periodo en reposo, al igual que los nuevos valores de permeabilidad, que muestran una buena representación de la evolución de las presiones de agua durante el periodo de prueba o de excavación.

Cabe recalcar que los modelos hechos en dos dimensiones muestran una buena representación de la respuesta hidro-mecánica de la roca. Las convergencias y desplazamientos de estos modelos nos dan una respuesta cercana a las observadas. Por otro lado las presiones de agua son más difíciles de representar. Naturalmente, un modelo con simetría axial no es capaz de producir una representación real de las variaciones de presiones de agua durante el avance de la excavación debido al efecto de la anisotropía de tensiones en el plano horizontal. Es por esto que se requiere de un análisis 3-D, presentado en este reporte, en donde permitiría una representación más exacta incorporando condiciones anisótropas en el plano horizontal siendo la presión de agua el factor determinante.

Basandose en los análisis y conclusiones del estudio realizado por la UPC “MODELLING OF REP EXPERIMENT” se hizo el mismo problema pero esta vez, un único estudio en tres dimensiones ya que en el modelo se logra introducir el efecto de tensión anisótropa. Este efecto resulta en variaciones de presión de agua lo cual es el factor determinante. Este problema fue modelado considerando una formulación acoplada hidromecánica junto a un código llamado Code_Bright, mencionado anteriormente, en donde se cumple el balance de masas de solidos, balance de masas de agua y balance de tensiones cumpliendo con leyes constitutivas apropiadas.

Este reporte se divide en 4 partes.

En la primera parte se explica la formulación hidromecánica junto a las leyes constitutivas utilizadas en el código de elementos finitos. La segunda parte consiste en describir los parámetros del material en estudio, la geometría del modelo con sus condiciones iniciales y condiciones de contorno y el proceso de excavación o proceso constructivo del problema. En la tercera parte se mostraran los resultados del modelo 3-D sin considerar el efecto del niche de instrumentación y se compararan con los resultados realizados por la UPC en 2-D. Por ultimo unas cuantas conclusiones serán presentadas.

2. Formulación matemática

2.1. Formulación-HM

La formulación utilizada en el código de elementos finitos Code_Bright está basada en un enfoque multi-fase/multi-especie. Para este problema se toman en cuenta el balance de masas de sólidos, el balance de masas de agua en condiciones saturadas y el balance de momentos o de tensiones, descritos continuación.

2.1.1. Balance de masas de sólidos

En la ausencia de los términos fuente y sumidero de la fase sólida debido a reacciones químicas, el balance de masas de un sólido se describe como:

$$\frac{\partial(\rho_s(1-n))}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{j}_s) = 0 \quad (\text{Ecuación 2-1})$$

donde, ρ_s es la densidad del sólido y \mathbf{j}_s es el flujo de masa de sólidos. En este caso, igual a las derivadas temporales de los desplazamientos \mathbf{u} de un medio poroso.

La ley constitutiva asociada a esta ecuación es la que corresponde a la densidad de la fase sólida.

$$\rho_s = \rho_{s0} e^{\alpha_s(p_s - p_{s0})} \quad (\text{Ecuación 2-2})$$

en donde \mathbf{p}_s es la presión media actuando sobre el grano (como los granos no se consideran porosos, \mathbf{p}_s viene siendo \mathbf{p} , que es la presión total media actuando en un único volumen representativo de roca).

ρ_{s0} es la densidad a la presión de referencia \mathbf{p}_{s0}

α_s es la compresibilidad del grano

2.1.2. Balance de masas de agua

En general la ecuación de balance de masas de agua incluye términos correspondientes a la fase gaseosa del agua ya que el agua se puede presentar en sus dos fases: líquida y gaseosa. Para este problema consideramos condiciones saturadas por lo que los términos de su fase gaseosa son eliminados de la fórmula general y terminamos obteniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{D_s(\rho_l^w n)}{Dt} + (\rho_l^w n) \text{div} \mathbf{u} + \text{div}(\rho_l^w \mathbf{q}_l) = f^w \quad (\text{Ecuación 2-3})$$

donde, ρ_l^w es la densidad del agua en su fase líquida

n es la porosidad

\mathbf{u} es el vector desplazamiento del medio

q_l es el flujo de Darcy de la fase líquida

Para saber mas de los orígenes de esta ecuación, referirse al manual del programa Code_Bright y a las entregas del proyecto emitidas por la UPC.

Las leyes constitutivas asociadas a esta ecuación son la correspondiente a la densidad líquida del agua y la ley de Darcy. En condiciones isotérmicas, la ecuación de la densidad líquida de agua será:

$$\rho_l^w = \rho_{l0}^w e^{\beta_w (p_l - p_{l0})} \quad (\text{Ecuación 2-4})$$

donde, p_l es la presión de la fase líquida (en este caso, igual a la presión de agua)
 ρ_{l0}^w es la densidad a una presión de agua de referencia p_{l0}
 β_w es el coeficiente de compresibilidad del agua

En condiciones isotérmicas y saturadas, la ley de Darcy es la siguiente:

$$q_l = -\frac{k_i}{\mu_l} \cdot \nabla \cdot p_l \quad (\text{Ecuación 2-5})$$

donde, k_i es el tensor de permeabilidad intrínseca
 μ_l es la viscosidad de la fase líquida (en este caso es igual a la viscosidad del agua)

El tensor de permeabilidad intrínseca k_i depende de la porosidad y es introducido por la ley de Kozeny-Karman.

$$k_i = k_{i0} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} \quad (\text{Ecuación 2-6})$$

en donde k_{i0} es el tensor de permeabilidad intrínseco a una porosidad de referencia n_0 .

Los valores de los parámetros ρ_{l0}^w , β_w , p_{l0} y μ_l son dados en la Tabla 1 y los valores de los parámetros k_{i0} y n_0 en la Tabla 2.

Tabla 1. Parámetros de referencia para el agua.

$\rho_{l0}^w (kg/m^3)$	$\beta_w (MPa^{-1})$	$p_{l0} (MPa)$	$\mu_l (MPa.s)$
1002.6	$4.5 \cdot 10^{-4}$	0.1 MPa	10^{-9}

2.1.3. Balance de tensiones

La ecuación de balance de tensiones es la siguiente:

$$\text{div}(\sigma) + \rho g = 0 \quad (\text{Ecuación 2-7})$$

donde, σ es el tensor de tensiones, ρ es la densidad de la roca y g la aceleración de la gravedad. Las incógnitas asociadas a esta ecuación son los desplazamientos del medio u .

Para representar el comportamiento de la roca arcillosa la UPC ha desarrollado un modelo destructivo/elastoplástico. Para simplificar aún más el problema, ya que con este modelo solo se obtuvo una respuesta dentro del rango elástico, en este problema se utilizó un modelo elástico lineal, explicado en la siguiente sección.

2.2. Descripción del modelo constitutivo

Como se mencionó en el apartado anterior, el modelo utilizado para este análisis es uno elástico lineal con parámetros E y ν con sus respectivos valores en la *Tabla 2*.

$$E = E_0 + (\phi - \phi_0) \frac{dE}{d\phi} \geq E_{min} \quad (\text{Ecuación 2-8})$$

donde, E es el módulo Young
 $dE/d\phi$ es la variación del módulo Young con la porosidad
 ϕ_0 es la porosidad de referencia
 ϕ_{min} es la porosidad mínima
 E_{min} es el módulo elástico mínimo

3. Descripción del modelo numérico

En esta sección se presentarán los parámetros del material, la geometría del modelo, sus condiciones iniciales, condiciones de contorno y el proceso constructivo del problema. Todos los parámetros mencionados a continuación fueron obtenidos en estudios previos antes de obtener los valores del experimento REP.

3.1. Parámetros del material

Con el propósito de obtener el mecanismo hidro-mecánico más propenso a que ocurriese durante el experimento REP, se ha hecho un cálculo hidro-mecánico anisótropo para este modelo predictivo. Los parámetros de esta simulación han sido escogidos de acuerdo a los valores de referencia presentados por (Departament d'Enginyeria de Terreny, Cartogràfica i Geofísica, 2016) (ANDRA, 2005) (Hoteit & Krieguer, 2005) ANDRA (2005). En la *Tabla 2* se pueden observar estos parámetros de referencia del suelo arcilloso.

Tabla 2. Parámetros de referencia para la arcilla Callovo-Oxfordiana (ANDRA, 2005)

PROPIEDADES	PARÁMETROS	SYMBOLO	VALOR
Física	Densidad del solido	ρ_{s0}	2.7 kg.m ⁻³
	Porosidad	ϕ	0.15
Hidráulica	Permeabilidad intrínseca	K_i	5.10 ⁻²⁰ m ²
Mecánica	Modulo Young	E	7000MPa
	Coefficiente Poisson	ν	0.23
	Compresibilidad del grano	β_s	9.5 10 ⁻⁵ MPa ⁻¹
Hidro-Mecánico acoplado	Coefficiente de Biot	b	0.6

Los valores de densidad, porosidad, permeabilidad intrínseca, coeficiente de Poisson, compresibilidad del grano y coeficiente de Biot fueron obtenidos directamente de ANDRA (2005). En cuanto al módulo Young de la roca, se tomó el menor valor del rango obtenido por mediciones dilatométricas in situ (entre 7000 y 120000 MPa).

3.2. Geometría

La geometría analizada corresponde cubo de suelo o roca con una altura de 120m, espesor de 120m y largo de 120m como se observa en la Figura 1.

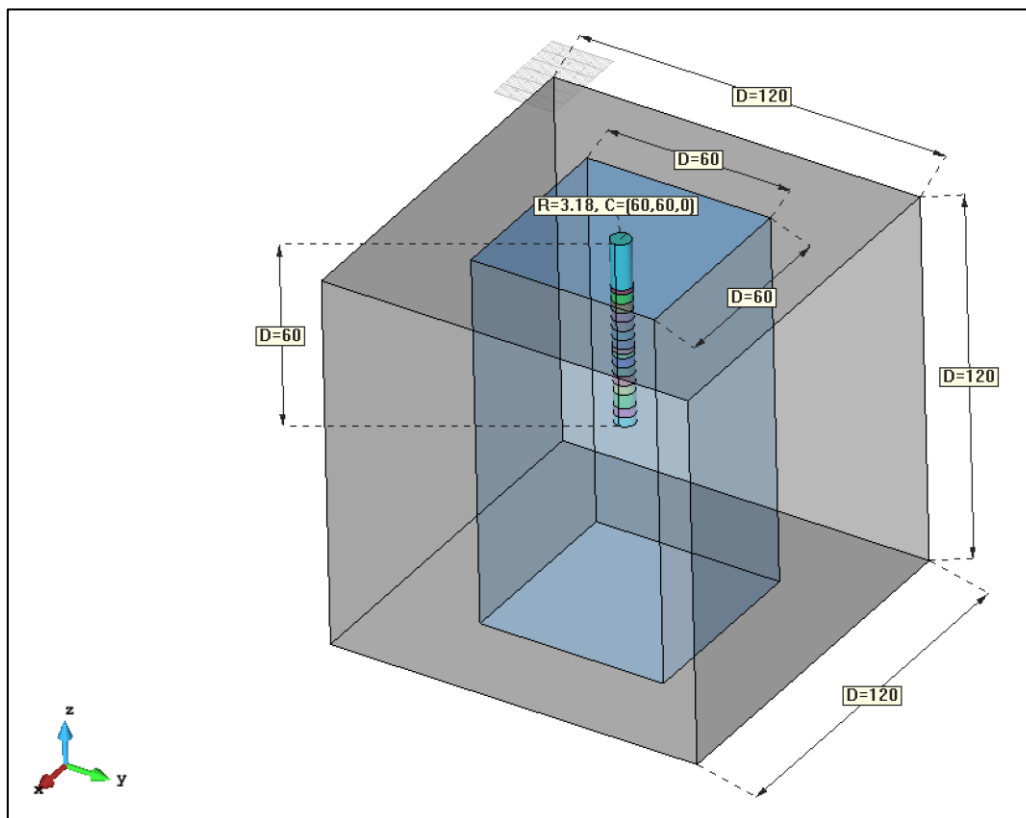


Figura 1. Geometría del modelo 3D. Se muestra geometría del modelo sin el niche de instrumentación.

También se puede observar un cubo de menor tamaño (60m x 60m x 120m) dentro del mayor. Esto es debido a que se realizó un mallado más refinado dentro de cubo pequeño para obtener resultados más reales cerca del pozo de excavación para observar el comportamiento del suelo en sus cercanías.

El límite superior del cubo corresponde a una elevación de -436.4m en el experimento REP y el límite inferior a una elevación de -556.6m, resultando en una altura de aproximadamente 120m como se mencionó anteriormente. El límite inferior está localizado aproximadamente a 80m de la zona de experimento REP.

El pozo tiene un radio aproximado de 3.18m y tiene una profundidad de excavación de 60m (-436.6m a -496.6) la cual corresponde a la zona de experimento REP.

3.3. Condiciones iniciales y condiciones de contorno

En esta sección, la Figura 2 nos muestra las condiciones iniciales y de contorno considerando una configuración de simetría axial centrada en el eje del pozo ya que el estudio se realizó en dos dimensiones. En el problema de tres dimensiones se consideraron las mismas condiciones para el cubo mostrado en la Figura 1.

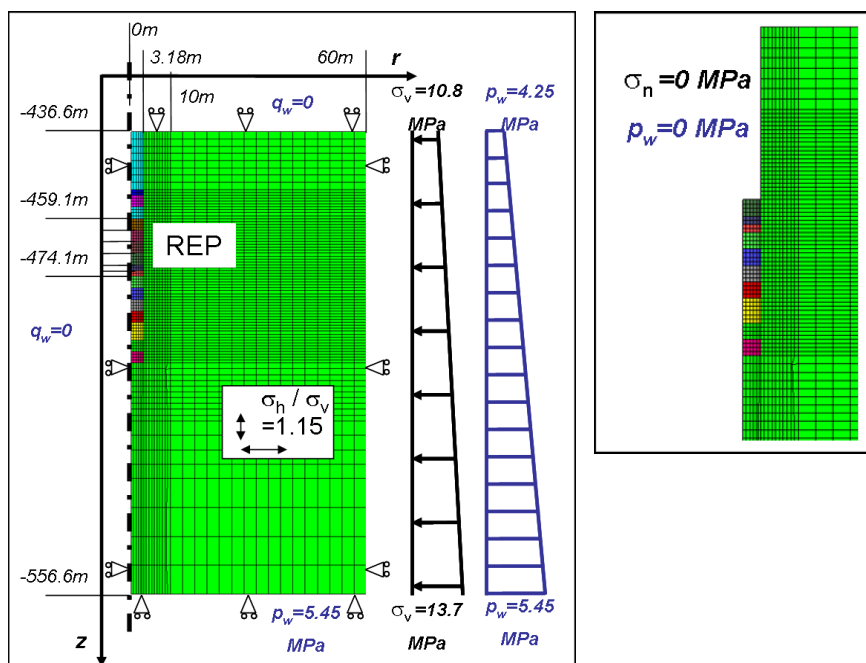


Figura 2. Condiciones iniciales y condiciones de contorno. Detalle del pozo después de la excavación VI85.

En el modelo bidimensional se fijan los desplazamientos en las direcciones horizontales y verticales en el contorno del rectángulo de la Figura 2. También se define un estado de esfuerzo inicial ortotrópico que corresponde a la distribución litostática especificada por ANDRA:

$$\sigma_z \text{ (kPa)} = -24.7 * 417 + 24.2 * (417 + z)$$

$$\sigma_r = 1.15 \sigma_v$$

La distribución lineal de tensiones se caracteriza por una presión o tensión vertical que va de -10.8 MPa en el límite superior y -13.7 MPa en el límite inferior de la malla. Dentro de las mismas elevaciones las tensiones horizontales vienen siendo 1.15 veces las verticales, resultando en una variación de -12.4 MPa a -15.7 MPa .

También se impone una distribución hidrostática inicial para tomar en cuenta la presión de agua. Estas presiones van de 4.25 MPa en el límite superior a 5.45 MPa en el límite inferior.

Se considera una porosidad constante n para la roca. Considerando que la densidad del sólido es de 2700 kg/m^3 y la densidad del sólido en condiciones saturadas es de 2420 kg/m^3 , n vendría siendo un 15%.

3.3.1. Condiciones de contorno (Modelo 3D)

En cuanto a las condiciones de contorno del modelo en 3D se fijan los desplazamientos en las direcciones X, Y y Z del cubo estudiado como se muestra en la siguiente Figura 3.

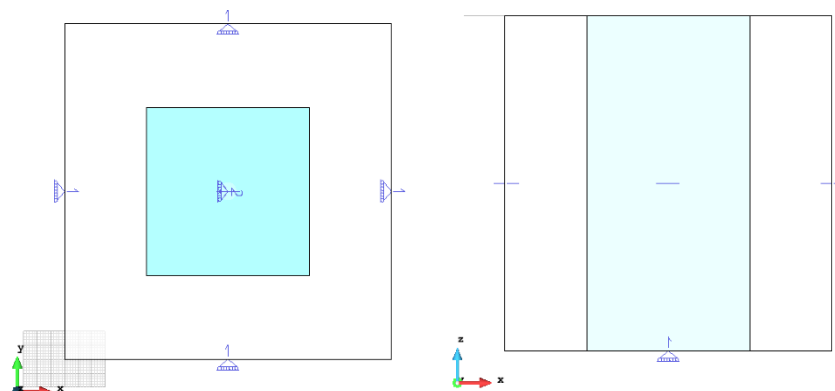


Figura 3. Planta y perfil del cubo donde se puede observar que los desplazamientos impuestos son nulos en sus respectivas direcciones.

También se le impuso una tensión vertical en la superficie superior del cubo para tomar en cuenta el peso del suelo desde el terreno natural hasta la elevación de -436.6m . Tener en cuenta que el volumen estudiado está conformado entre las elevaciones de -436.6m hasta -556.6m . Esta tensión vertical es de -10.8 MPa mostrado en la Figura 4a. Así también se le impuso una condición de flujo en la superficie inferior del cubo cuya presión de agua prescrita es de 5.45 MPa (Figura 4b).

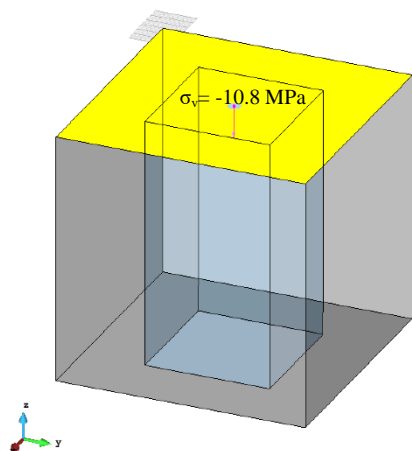


Figura 4a. Presión vertical prescrita en la superficie superior -10.8 MPa .

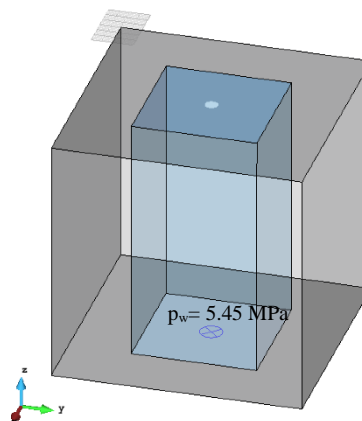


Figura 4b. Condición de flujo prescrita en la superficie inferior con $p_w=5.45 \text{ MPa}$.

3.3.2. Condiciones iniciales (Modelo 3D)

Para este modelo, al igual que el de 2D, se considera una distribución lineal definida anteriormente.

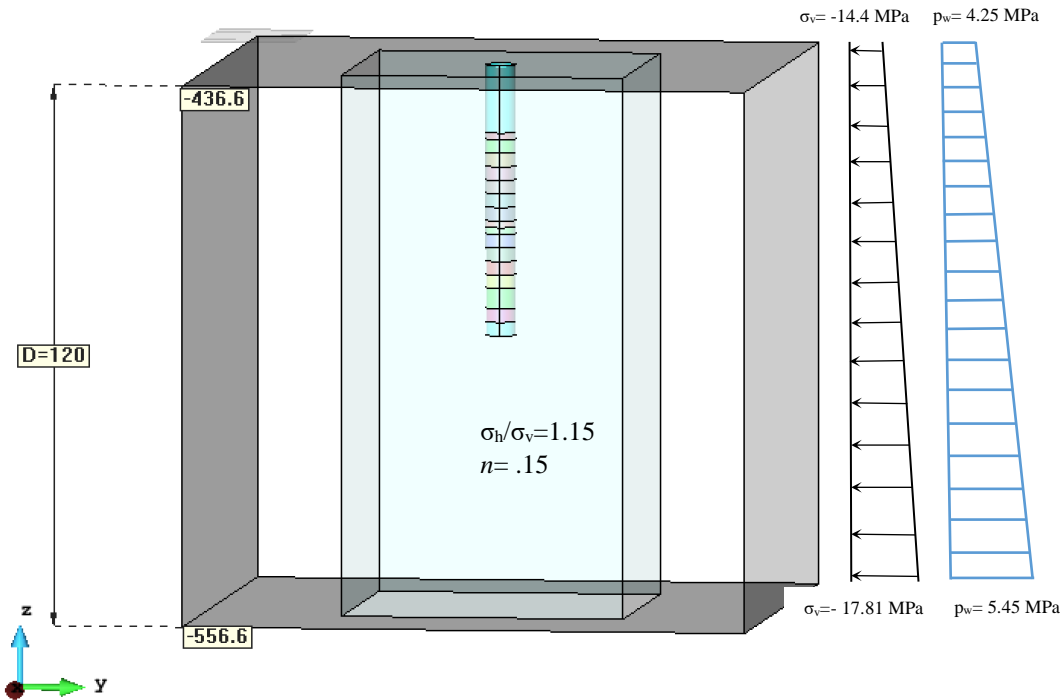


Figura 5. Descripción gráfica de las condiciones iniciales del problema.

Esta distribución lineal es considerada en todos los volúmenes (volumen del pozo, volumen interno y volumen externo) por una distancia de 120m la cual representa la profundidad del cubo de roca estudiado. La única diferencia al modelo 2-D es que se considera una tensión horizontal mayor de 1.3 veces la tensión vertical en dirección Y y una tensión horizontal menor de igual magnitud que la vertical debido a la anisotropía tensional en el medio. De igual manera se considera una porosidad inicial n , de .15.

3.3.3. Proceso constructivo

La excavación del pozo se realizó por medio de voladura con dinamita por distintas fases. Cada excavación se modeló removiendo el volumen del suelo de la malla, correspondiente a esa fase de excavación, en donde automáticamente las tensiones normales en la pared del pozo del volumen excavado se le imponen un valor de 0. También se le impone una condición hidráulica en donde las presiones de agua son iguales a 0 en las paredes del pozo.

En la Tabla 3 se muestra el esquema real y el esquema simulado de la excavación del pozo. Para el modelo 3D se usó como referencia el esquema simulado bordado en color rojo.

Tabla 3. Esquema de excavación real vs. simulado.

ESQUEMA REAL			ESQUEMA SIMULADO			
Fase de excavación	Elevación del frente [m]	Tiempo	Frente de Elevación [m]	Tiempo	Altura de cada fase [m]	Tiempo entre cada fase [días]
V179	-451.6	13/06/2004	-451.6	14/06/2004		9 months
Excavation of instrumentation niche		12/08/2004				
V180	-453,20	10/03/05 at 23:25	-453.10	11/03/2005	1.5	4.1
V181	-456,27	15/03/05 at 03:25	-456.10	15/03/2005	3.0	44.0
V182	-458,56	27/04/05 at 18:27	-459.10	28/04/2005	3.0	6.0
V183	-461,67	04/05/05 at 11:48	-462.10	04/05/2005	3.0	6.9
V184	-464,89	11/05/05 at 04:40	-465.10	11/05/2005	3.0	6.0
V185	-468,3	17/05/05 at 01:10	-468.10	17/05/2005	3.0	23.0
V186	-470,31	08/06/05 at 07:15	-471.10	09/06/2005	3.0	4.1
V187	-472,63	11/06/05 at 01:36	-472.60	13/06/2005	1.5	3.0
V188	-474,64	15/06/05 at 21:30	-474.10	16/06/2005	1.5	8.9
V189	-477,4	24/06/05 at 02:50	-477.10	25/06/2005	3.0	5.0
V190	-480,35	30/06/05 at 07:31	-480.10	30/06/2005	3.0	16.1
V191	-483,36	15/07/05 at 11:30	-483.10	16/07/2005	3.0	33.0
V192	-487,70	18/08/05 at 03:43	-486.10	18/08/2005	3.0	14.9
V193	-490.8	02/09/2005	-490.60	02/09/2005	4.5	15.0
V194	-493.5	17/09/2005	-493.60	17/09/2005	3.0	6.0
V195	-496.6	23/09/2005	-496.60	23/09/2005	3.0	

Como se puede observar en la Tabla 3, se llegó a una profundidad de 451.6m en la fecha 13/06/2004. Una vez excavada esta fase (V179), la excavación se detiene por 9 meses. Durante estos 9 meses se empieza a construir un nicho lateral a una profundidad de 445m. En este nicho se instala instrumentación verticalmente y también con ángulo de inclinación alrededor del pozo que se va a excavar, entre las profundidades de 460m y 470m (piezómetros, extensómetros e inclinómetros) como se muestra en la Figura 3. La mayoría de la instrumentación se instaló a una profundidad de 20-25m del suelo del nicho y a 15-20m del nivel alcanzado en el pozo en ese momento.

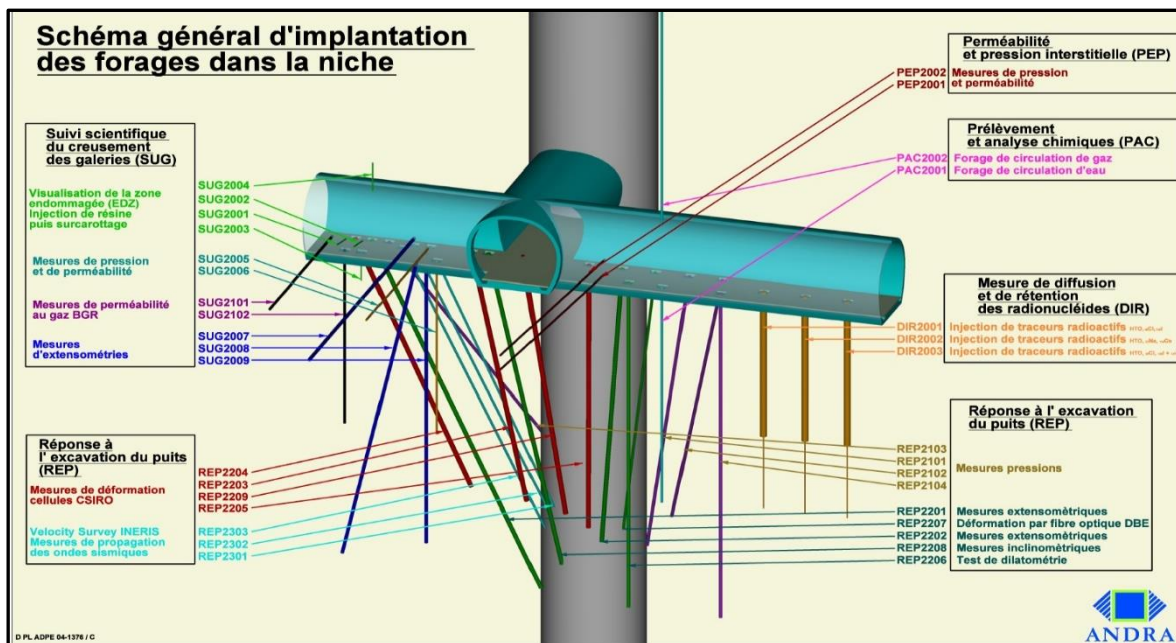


Figura 6. Localización del niche y un esquema de la instrumentación implementada.

En la Figura 6 se muestran toda la instrumentación utilizada en este proyecto de gran escala. Para propósitos de este reporte solo se utilizaron valores de la instrumentación de los extensómetros REP2201_DFO y REP2202_DFO; el inclinómetro REP2208_ICL; los piezómetros REP2101_PRE, REP2102_PRE, REP2103_PRE y REP2104_PRE mostrados en la Figura 7.

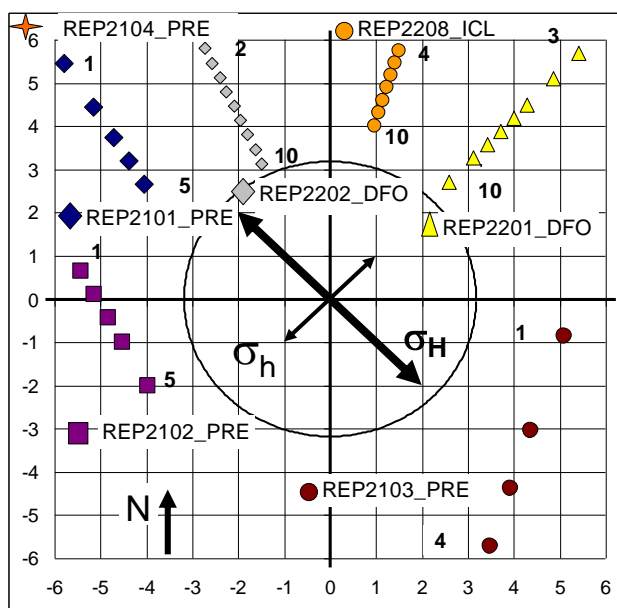


Figura 7. Sección del pozo donde se muestra la posición de la instrumentación y la dirección de la tensión mayor y menor. Dirección de tensión mayor: N135°E.

Después de los nueve meses, se retoma la excavación del pozo la fecha *11/03/2005* (V180). La excavación desde el nivel -451.6m a -496.6m (43.4m) tomo alrededor de 7 meses con 16 explosiones con una profundidad aproximada de 1 a 3m. El recorrido por la zona instrumentada (nivel -462.1m a -471.1m) demoro 40 días (de 04/05/2005 hasta 09/06/2005).

4. Resultados

4.1. Presiones de agua

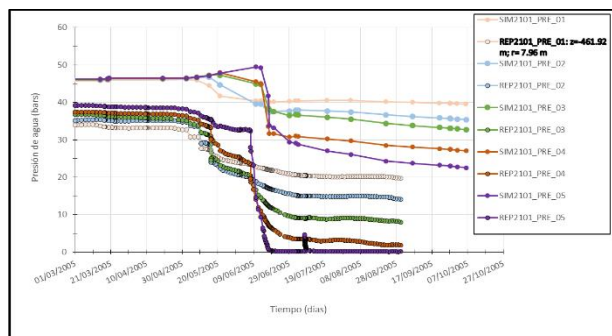
En esta sección se presenta analiza la evolución de las presiones de agua comparando los resultados de la simulación numérica y las medidas de in situ de los 20 piezómetros localizados en la zona de estudio REP.

Se instalaron 20 piezómetros en 3 sondeos inclinados (REP2101, REP2102 y REP2103) y uno sondeo vertical (REP2104) perforados dentro del niche de instrumentación. Los sondeos REP2101, REP2102 y REP2103 contienen 5 piezómetros cada uno, localizados a una profundidad entre $z=-463\text{ m}$ y $z=-470\text{ m}$ y a una distancia del eje central del pozo de $r=4.4\text{ m}$ y $r=8\text{ m}$. El sondeo REP2104 también contiene 5 piezómetros pero a diferencia de los otros, están localizados lejos del pozo ($r=17\text{ m}$) y a una profundidad entre 458 m y 470 m . REP2101 y REP2103 están situados en la dirección de mayor tensión horizontal y REP2102 en la dirección de menor tensión horizontal (ver Figura 7).

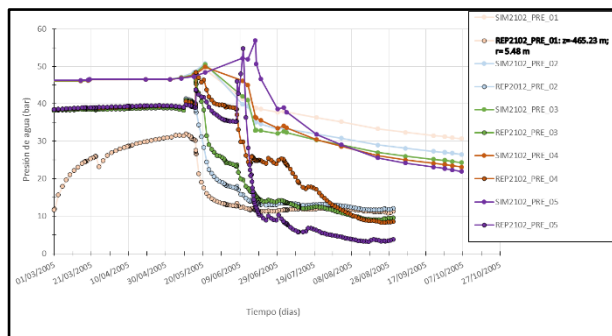
En la Figura 8 se muestra la evolución de las presiones de agua medidas y las predichas por el modelo 3-D durante el tiempo del experimento REP al igual que las presiones en cada sensor o piezómetro.

Se puede observar, de estas gráficas, que a medida avanza el frente de excavación y se acerca a la zona de experimentación REP, los sensores perciben cambios en la presión de agua. Estos cambios pueden significar una reducción en las presiones de agua, evidente en los sondeos REP2101 y REP2103 o un aumento de presiones de agua como en el sondeo REP2102. Seguido de estas reducciones o incrementos de presiones de agua, hay un cambio brusco que resulta en la reducción de presiones de agua después de que el frente de excavación pasa por la zona de estudio. Después de este cambio brusco se observa una disminución progresiva en las presiones de agua a causa de la condición de drenaje impartida hacia el pozo.

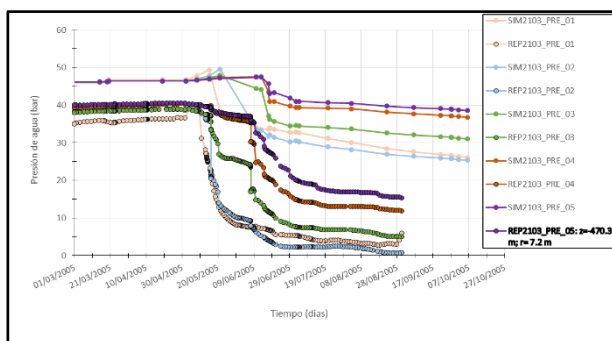
En cuanto al modelo predictivo en 3-D las presiones de agua predichas en los puntos de medida tienen una tendencia o comportamiento muy similar a las curvas experimentales pero están desplazadas por encima de estas resultando en mayores valores de presiones de agua al final del periodo de espera. Para observar mejor la capacidad del modelo en reproducir el mismo comportamiento que las medidas in situ, la Figura 9, Figura 10, Figura 11 y Figura 12 se han desplazado las curvas hacia abajo una distancia equivalente a la diferencia inicial entre las presiones de agua.



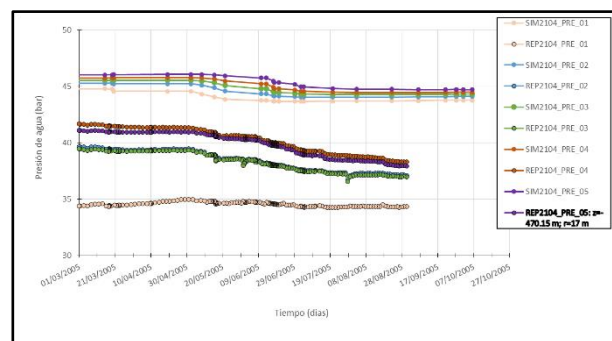
a



b

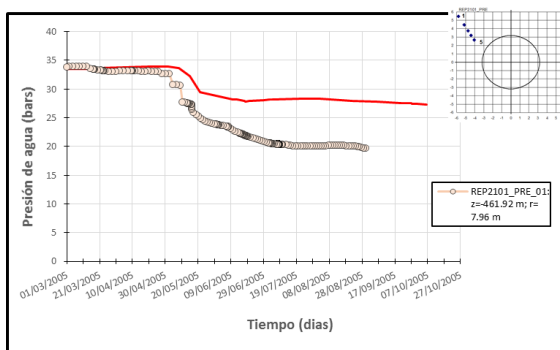


c

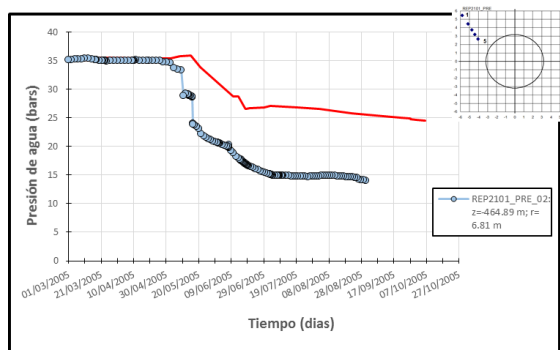


d

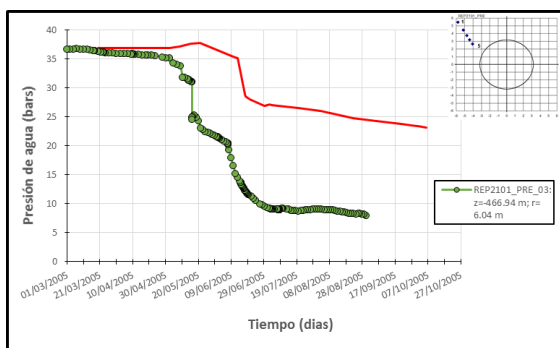
Figura 8. Comparación entre las medidas de presiones de agua in situ (piezómetros REP2101, REP2102, REP2103 Y REP2104) vs. valores simulados por el modelo 3-D (SIM2101, SIM2102, SIM2103 y SIM2104).



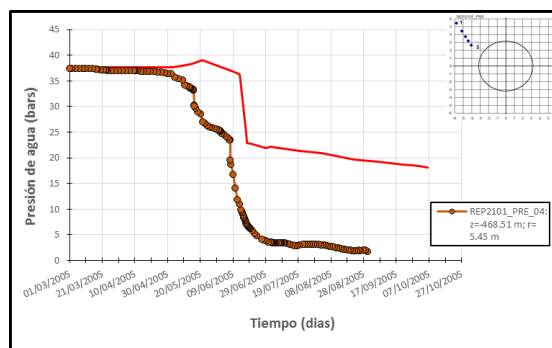
a



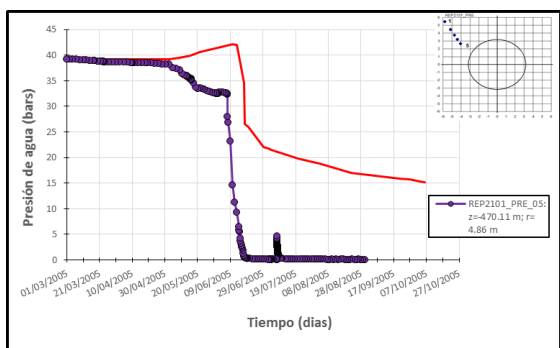
b



c

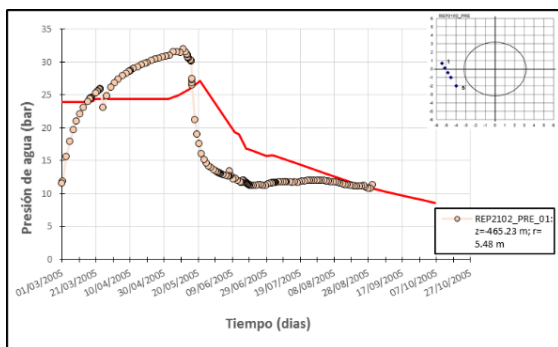


d

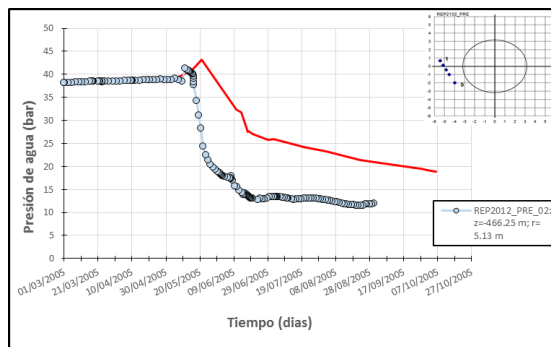


e

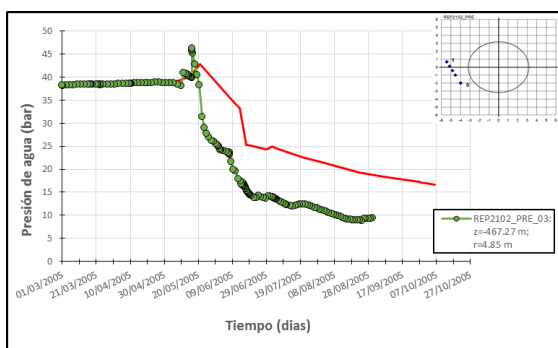
Figura 9. Comparación entre las presiones de agua medidas in situ por el piezómetro REP2101 vs. las presiones de agua generadas por el modelo.



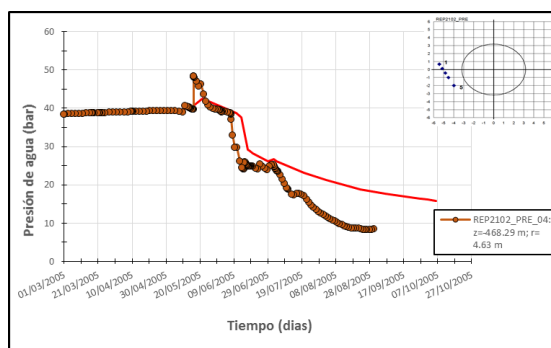
a



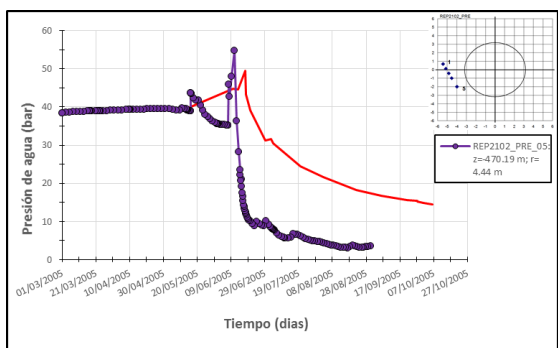
b



c

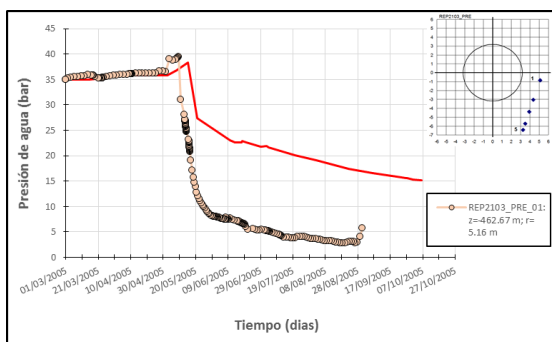


d

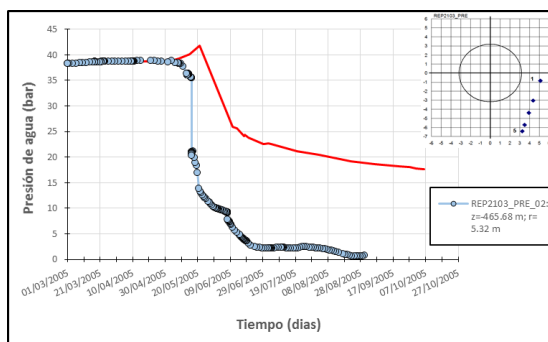


e

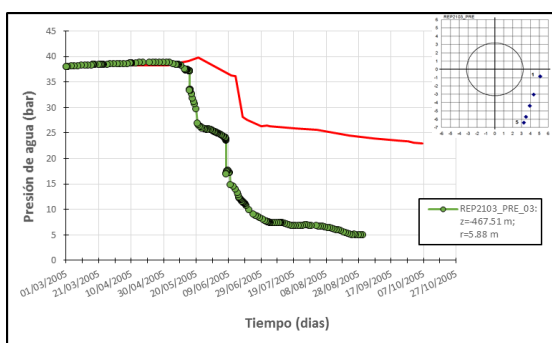
Figura 10. Comparación entre las presiones de agua medidas in situ por el piezómetro REP2102 vs. las presiones de agua generadas por el modelo.



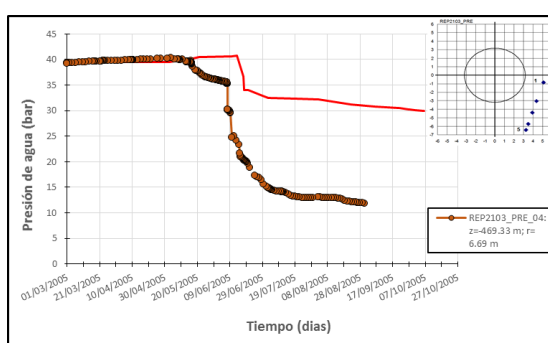
a



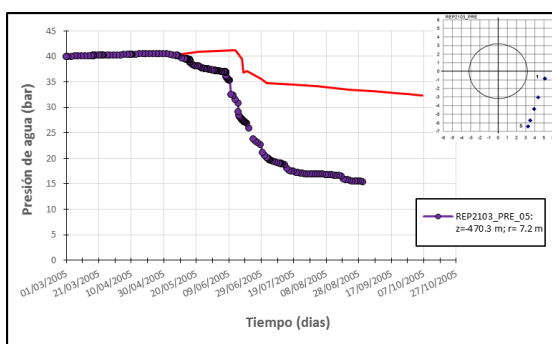
b



c

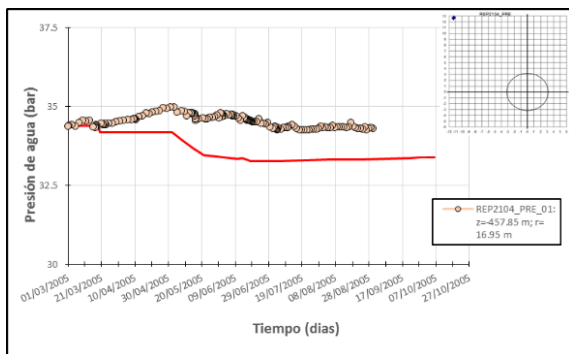


d

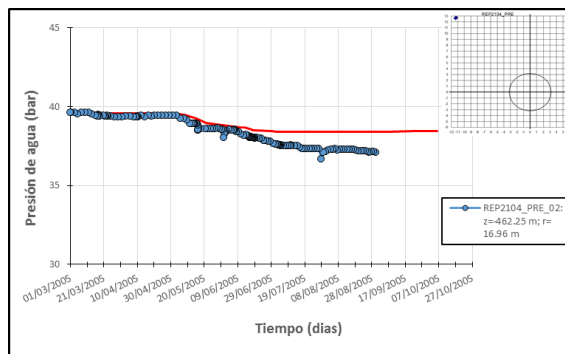


e

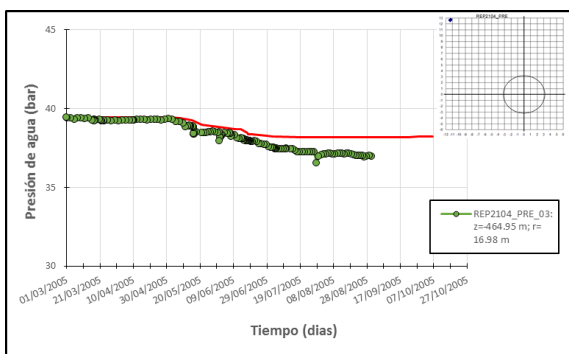
Figura 11. Comparación entre las presiones de agua medidas in situ por el piezómetro REP2103 vs. las presiones de agua generadas por el modelo.



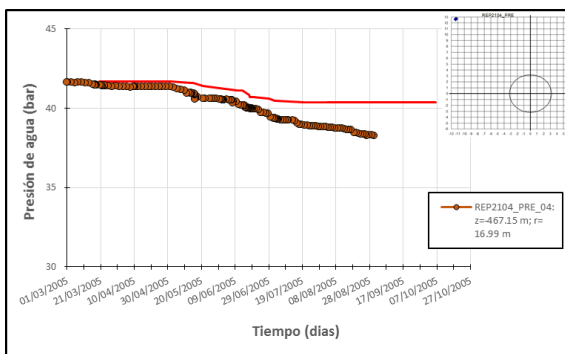
a



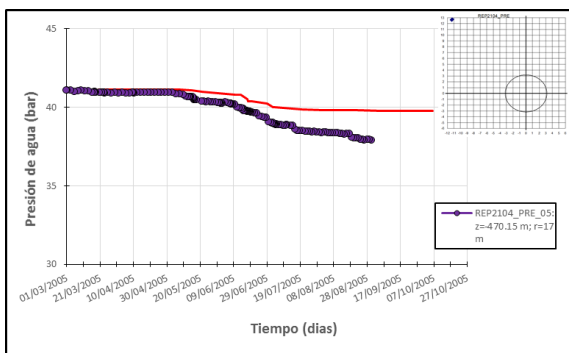
b



c



d



e

Figura 12. Comparación entre las presiones de agua medidas in situ por el piezómetro REP2104 vs. las presiones de agua generadas por el modelo.

Se pueden hacer dos observaciones basadas en las gráficas mostradas en las figuras anteriores:

La primera observación tiene que ver con los valores de presiones de agua predichos por el modelo en el momento en que pasa el frente de excavación por la zona experimental REP. El modelo muestra un incremento en las presiones de agua muy parecido a los observados en el sondeo REP2102 pero opuestos a los observados en los sondeos REP2101 y REP2103. Esto se debe a que en una geometría circular, como la del pozo estudiado, tratamos con hueco cilíndrico en un medio elástico bidimensional anisótropo que se caracteriza por desarrollar una zona de extensión en la dirección de mayor tensión principal y una zona de compresión en la dirección de menor tensión principal, lo que hace que este hueco se deforme como un ovalo. En el caso de una excavación no drenada en un medio saturado, como lo es en este problema, debido a la velocidad de avance del frente y la baja permeabilidad de la roca se traduce en una respuesta en el cambio de tensiones totales, disminuyendo las presiones de agua en la dirección de mayor tensión horizontal e incrementado en la dirección de menor tensión horizontal. En el modelo se impusieron condiciones nulas presiones de agua en las paredes del pozo excavado por lo que se observan incrementos tanto en la dirección de mayor tensión horizontal como en la de menor tensión horizontal.

La segunda observación se basa en lo acontecido después de que el frente de excavación pasa por los puntos de medida REP. Primero se observa un cambio brusco en las presiones de agua debido a la descarga no drenada de la roca por la excavación. Cualitativamente, la respuesta del modelo es similar a la observada en la realidad pero la disminución de las magnitudes de presiones de agua predichas por el modelo son significativamente menores que las medidas in situ. Después de este cambio brusco, siguen disminuyendo las presiones de agua progresivamente a causa del drenaje del agua hacia el pozo. La respuesta predicha por el modelo también muestra una progresión más lenta en la disminución de las presiones de agua que las observadas.

Por otro lado, la simulación del modelo mostrado en la Figura 12 si tiene una buena reproducción del comportamiento de las presiones de agua a distancias lejanas del pozo.

5. Conclusiones

Después de haber estudiado las presiones de agua como factor determinante del problema REP, se puede concluir que utilizar un modelo de simulación numérica en 3 dimensiones y un programa de elementos finitos, como lo es CODE_BRIGHT, resulta en un comportamiento realístico y capaz de representar la respuesta hidromecánica de la roca.

Los cambios en las presiones de agua simulados tienden a ser bien representados con los observados. Los valores iniciales de presiones de agua simulados son superiores a las medidas ya que no se considera el nicho de experimentación, el cual serviría como una fuente de drenaje durante el periodo de descanso resultando en esta diferencia en las presiones de agua.

En cuanto a los valores finales de presiones de agua, la simulación muestra resultados significativamente mayores debido a que la malla del modelo es muy densa. La malla 2-D es más fina y reproduce mejor los gradientes de presión de agua. En la malla 3-D, se hace una interpolación lineal entre los nodos de cada elemento en la malla y esto puede llevar a las diferencias observadas.

Los picos observados cuando el frente de excavación se encuentra cerca de los punto de medida son bien representados por el modelo (SIM2102) ya que estos piezómetros se encuentran en la zona de compresión en la dirección de menor tensión horizontal resultando en estos incrementos de presión de agua. Por otro lado, la simulación muestra incrementos en las presiones de agua (SIM2101 y SIM2103) en las zonas de extensión en la dirección de mayor tensión horizontal debido a que se consideró un flujo nulo de agua en las paredes del pozo.

Bibliography

- ANDRA. (2005). *Specification for modelling of the REP experiment*. Specification, ANDRA/DS/MG, Underground Research Laboratory of Meuse/Haute-Marne (MHM-URL). Recuperado el 16 de May de 2005
- Departament d'Enginyeria de Terreny, Cartogràfica i Geofísica. (2016). *CODE_BRIGHT USER'S GUIDE*. Barcelona, Barcelona, Spain: UPC. Obtenido de https://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright/code_bright
- Hoteit, N., & Krieguer, J.-M. (31 de January de 2005). Bure Site In situ Experiments Progress state and First results in Geomechanics. (C.TR.ASMG.05.0020).
- Vaunat , J., Benoit, G., & Gens, A. (2006). *MODELLING OF REP EXPERIMENT; Contributin to Modex-Rep Deliverables D5, D6 & D7*. Technical University of Catalonia (UPC), Dept. Geotechnical Engineering and Geosciences , Barcelona.